

Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos.

Francisco J. Amórtegui Gil
Ingeniero Electricista
Docente Universidad Nacional de
Colombia
Mayo de 2011



OPEN

OPORTUNIDADES
DE MERCADO PARA
ENERGÍAS LÍMPIAS
Y EFICIENCIA
ENERGÉTICA

Programa OPEN - Cámara de Comercio de Bogotá

Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

OBJETIVO

Presentar al auditorio los niveles de pérdidas en instalaciones eléctricas y Transformadores, los factores agravantes y medidas mitigantes de las pérdidas de energía.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

METODOLOGÍA

Se tomará la instalación eléctrica como un sistema de entrada y salida de energía donde el inverso de la eficiencia será la medida de la energía consumida por unidad de producto (kWh) entregado. Con estas relaciones y las de la empresa de consumo de energía por unidad de producto, se puede hallar el impacto en la producción.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

- **Objetivo**

Presentar al auditorio los niveles de pérdidas en instalaciones eléctricas y Transformadores, los factores agravantes y medidas mitigantes de las pérdidas de energía.

- **Transformadores e instalaciones eléctricas.**

- Generalidades: Partes. Funcionamiento, Circuito equivalente
- Eficiencia en transformadores: Pérdidas en el hierro, Pérdidas en el cobre, Otras pérdidas
- Eficiencia de transformadores de distribución y de industrias.
- Pérdidas máximas admisibles en las normas y países
- Eficiencia en instalaciones eléctricas, Influencia de la longitud de acometida, Influencia de la temperatura, Influencia del calibre del conductor, Influencia de la tensión



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Recuperación de inversiones (Taller)

Incremento de las pérdidas y medidas mitigantes por:

Factor de potencia, Distorsión armónica (Factor K), Desbalance de fases, Picos de carga y uso de sistemas inteligentes

Transformadores eficientes:

Cambios en los materiales ferro magnéticos



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

“Pienso que hay un mercado mundial para unos cinco computadores” *Thomas J. Watson Jr, Presidente IBM (1943)*

ENIAC

- Construido por Penn's Moore School of Electrical Engineering en 6 meses, Costo \$500,000
- Peso: 27 T
- 17,468 tubos, 7,200 diodos, 1500 relevos,
- 70 mil resistencias, 10 mil condensadores
- 5 millones de uniones de soldadura
- 2.4m x 1m x 30m
- Fuente 150kW
- 5000 adiciones-substracciones por segundo



Where a calculator like the ENIAC today is equipped with 18,000 vacuum tubes and weighs 30 tons, computers in the future may have only 1,000 vacuum tubes and perhaps weigh only half a ton.”

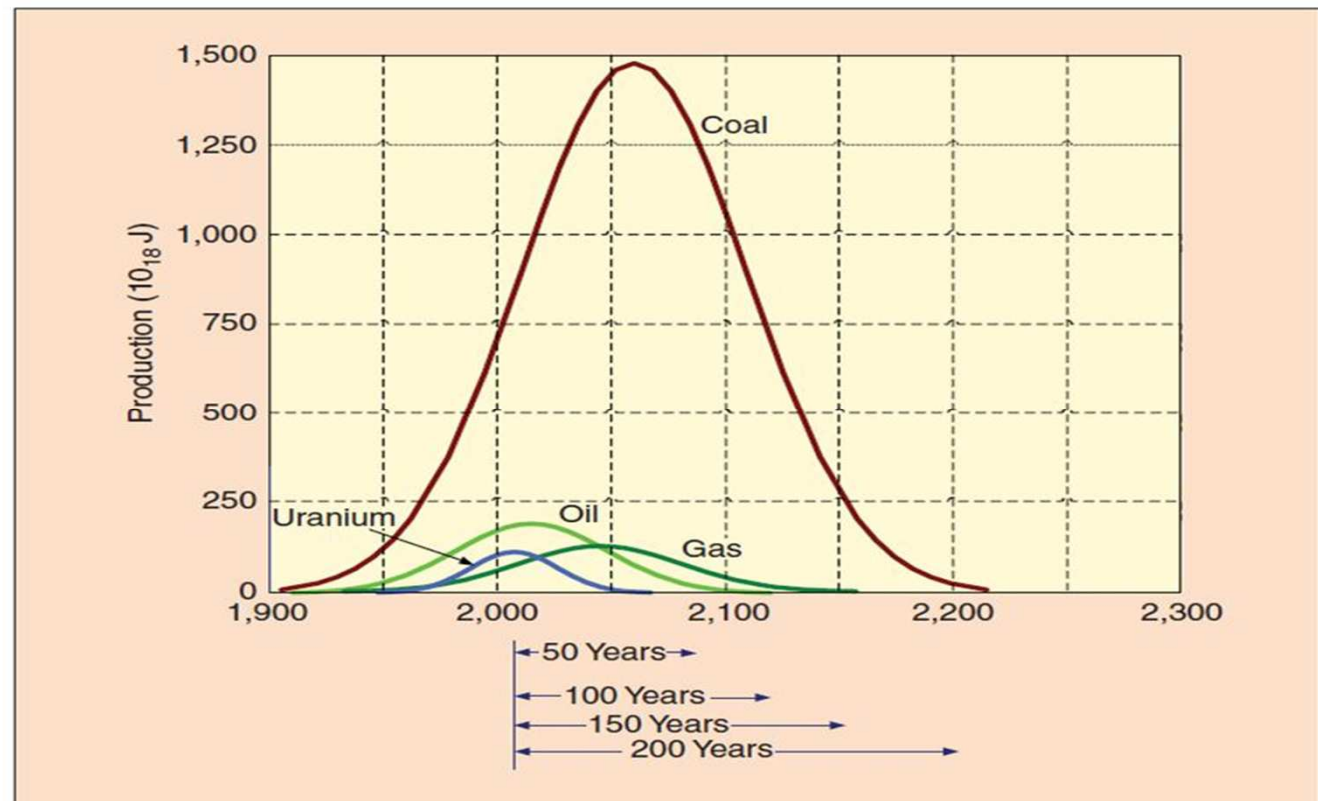
– Popular Mechanics, March 1949

Cortesía de L.A. Huertas



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Disponibilidad mundial de recursos energéticos



Bose, U de Tennessee

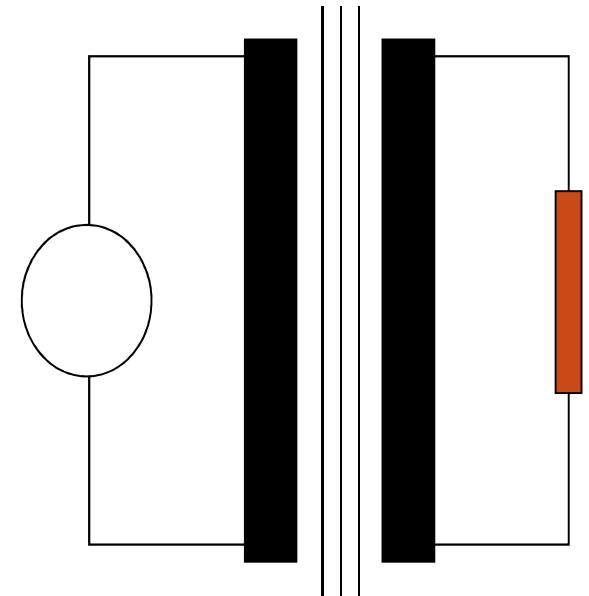
Cortesía de L.A. huertas



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Transformador

Máquina eléctrica estática que funciona por acoplamiento magnético entre bobinas cuya misión principal es cambiar los niveles de tensión de los sistemas eléctricos, también se usan para mantener un aislamiento galvánico entre sistemas eléctricos.

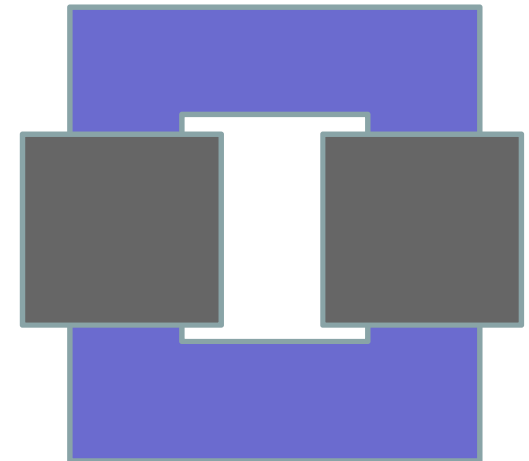


Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Partes Activas De Un Transformador.

Núcleo: Medio de acoplamiento entre devanados, normalmente de material ferromagnético para disminuir las corrientes de magnetización en frecuencia industrial.

Devanados: Arrollamientos de material conductor, normalmente en cobre, uno llamado primario desde donde se alimenta desde una red de energía y el otro secundario desde donde entrega la energía a la carga.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Funcionamiento del Transformador:

Al conectar el transformador a una fuente de tensión se inicia la circulación de una corriente eléctrica que crea un campo magnético en el núcleo de tal forma que la tensión inducida en el devanado primario es “igual” a la tensión de la fuente de alimentación menos la de la caída de tensión en la resistencia del devanado.

Este campo magnético compartido con el otro devanado por medio del núcleo, induce en él una tensión. Al conectarle a este último devanado una carga la corriente circulante trata de disminuir el campo magnético del núcleo lo que obliga al primario a incrementar su corriente para mantener la condiciones de tensiones en su circuito.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

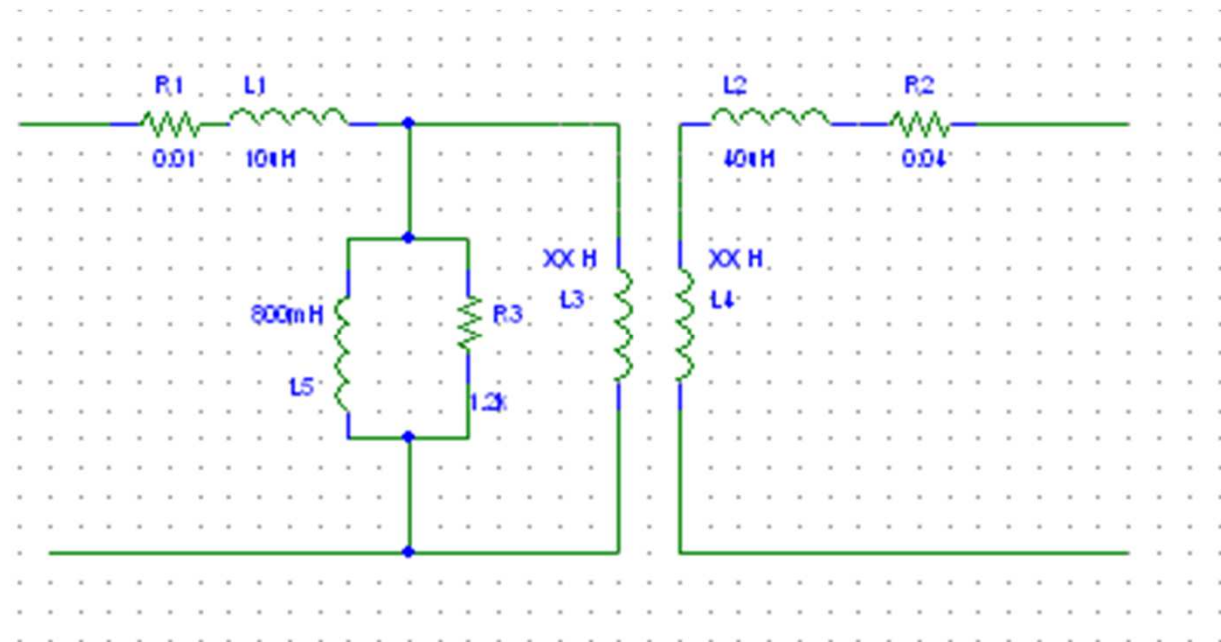
Tipos de transformadores;

- Por la conexión de sus devanados: Transformadores y autotransformadores, estos últimos son mas eficientes porque comparten corrientes entre devanados y esto disminuye las perdidas en el cobre
- Por su aislamiento: Secos o en liquido refrigerante
- Por la cantidad de fases: Monofásicos trifásicos
- Por las conexiones entre diferentes fases: Estrella, Delta, Zig-Zag.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Circuito equivalente de un transformador monofásico



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Pérdidas en el Hierro:

Se refieren principalmente a la potencia que disipa el núcleo en virtud de los cambios en la magnitud y dirección de la polarización magnética, se incrementan con el incremento en la magnetización del núcleo (es decir con el incremento en los niveles de tensión aplicada), mas las debidas a las corrientes inducidas en el núcleo y en la carcasa.

Pérdidas en el Cobre:

Se refiere a las pérdidas por calentamiento del cobre en virtud de la corriente que circula por los devanados.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Definición de eficiencia:

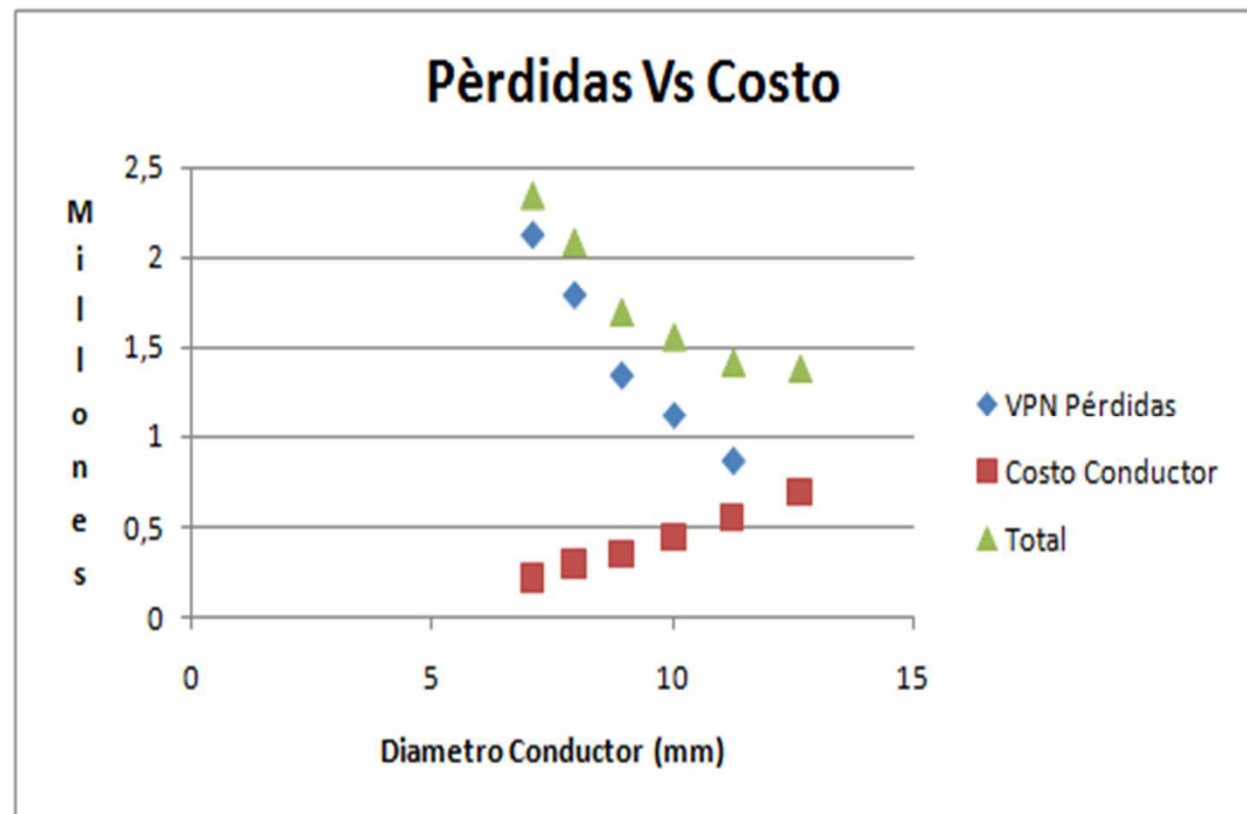
Relación entre la potencia entregada y la potencia absorbida por el sistema.

$$\eta = 1 - \frac{P_{Fe} + P_{Cu}}{P_{carga} + P_{Fe} + P_{Cu}}$$



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

**Ciclo de carga 24h (Mínimo 2 óptimo 4/0
AWG)**

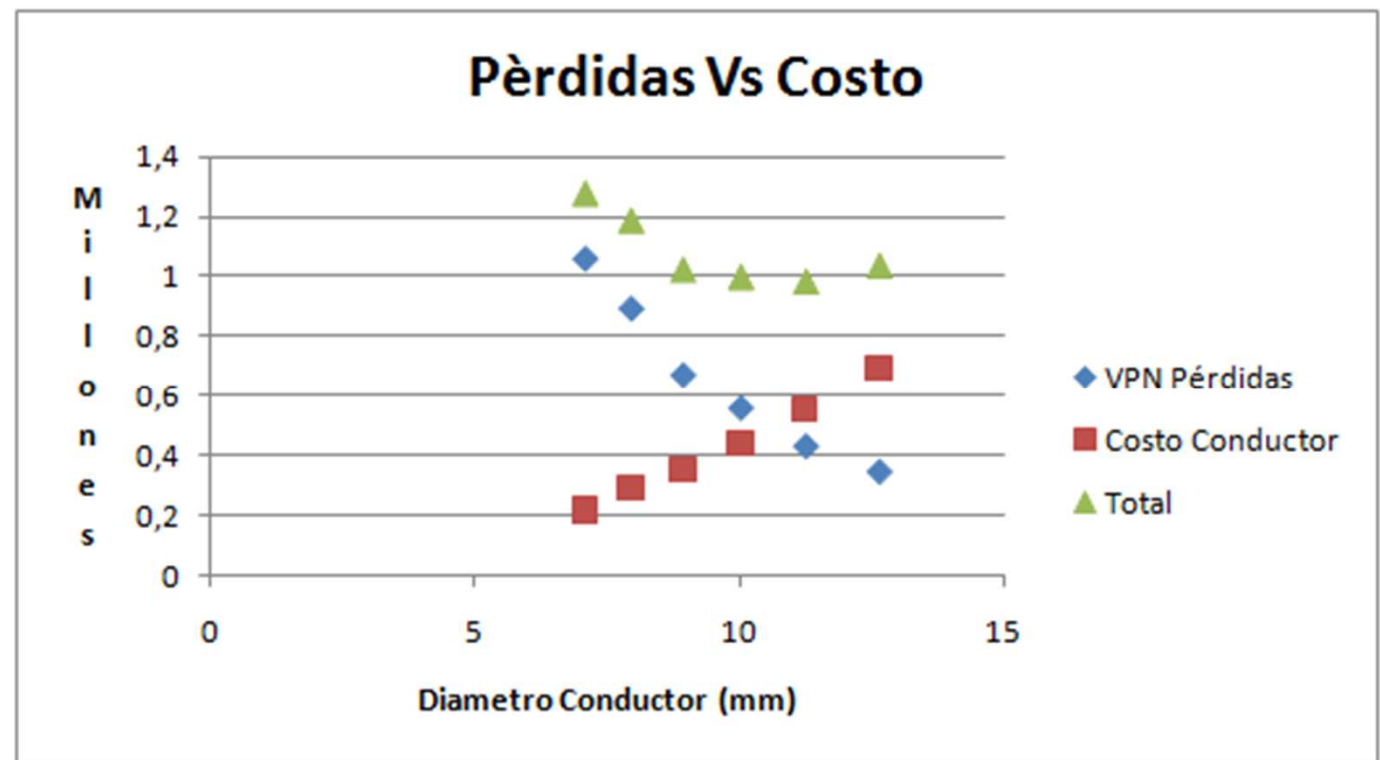


**Para 100 A, por cada 10 m. de alimentador a \$350/kWh, TI 4% y
15 años**



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Ciclo de carga 12h (Min 2; Opt. 2/0)

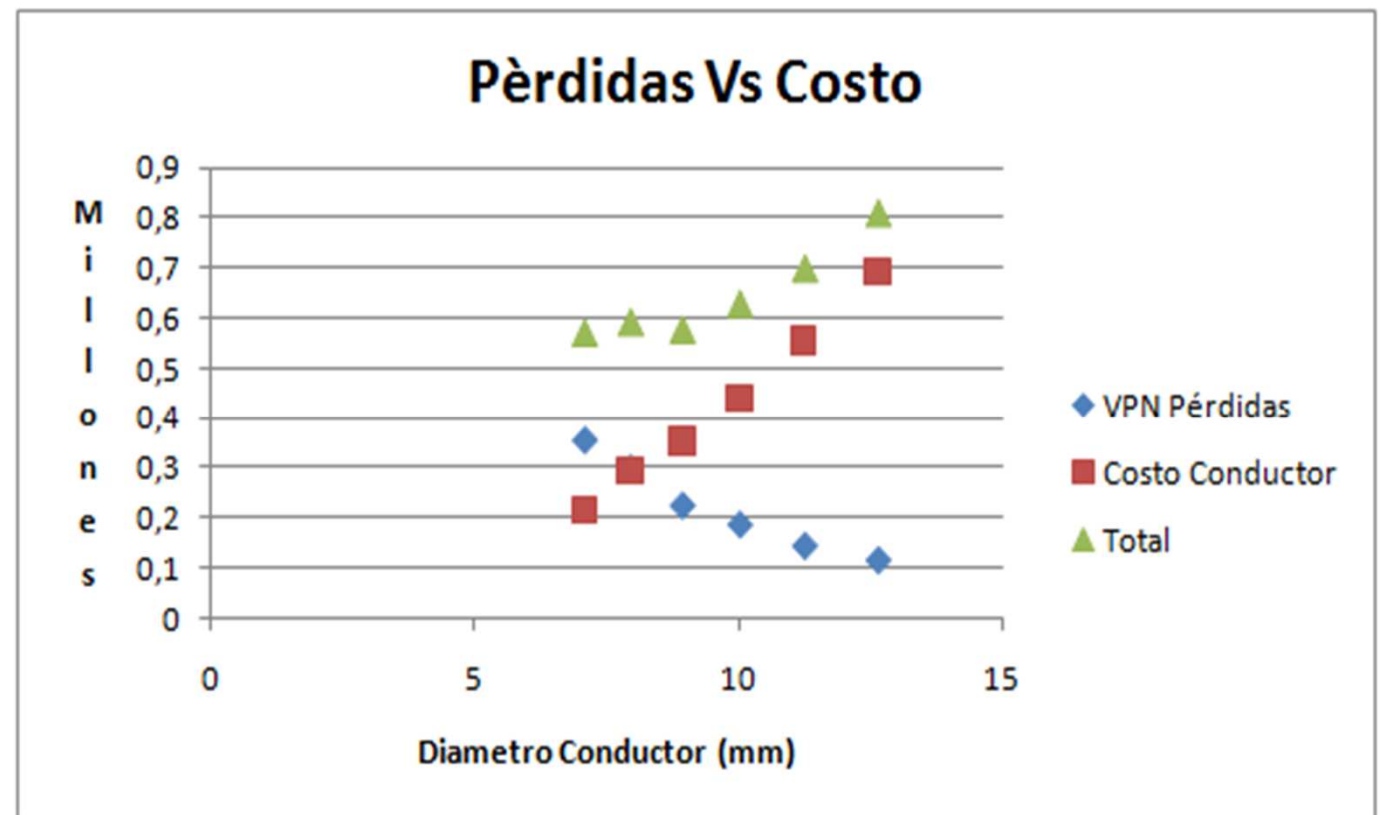


Para 100 A, por cada 10 m. de alimentador a \$350/kWh, TI 4% y 15 años



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Ciclo de carga 4h (Min. 2 Opt 1)



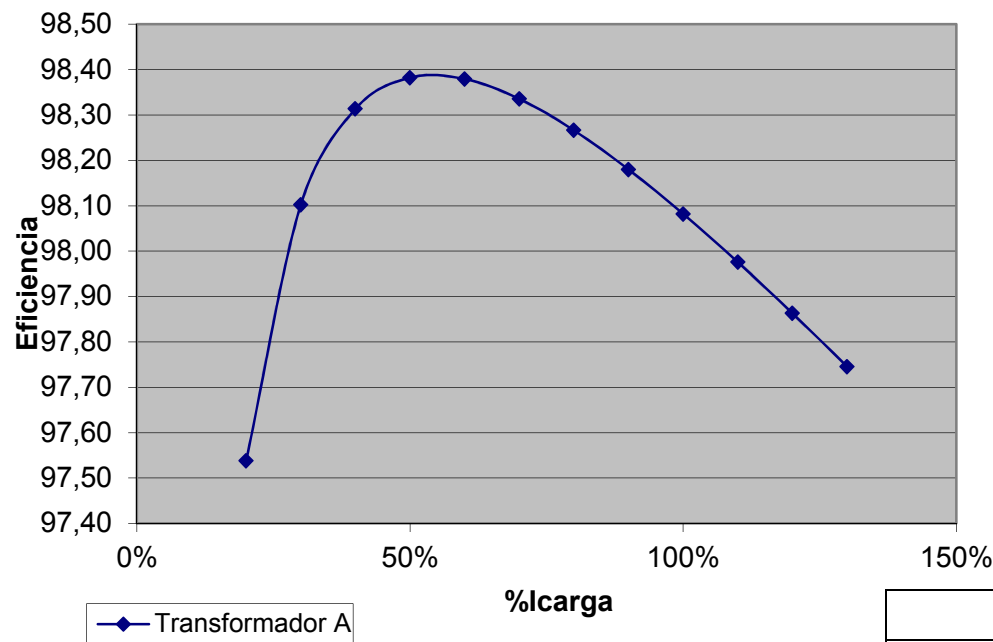
Para 100 A, por cada 10 m. de alimentador a \$350/kWh, TI 4% y 15 años



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Eficiencia de un transformador;

Eficiencia Transformador vs I carga



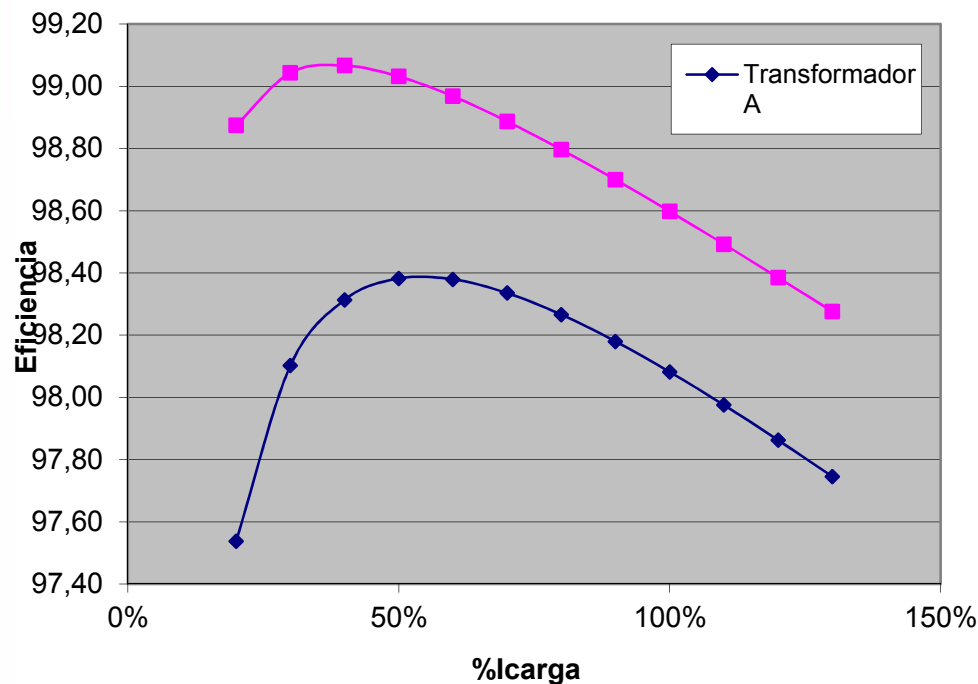
Transformador A		
S	112,5	kVA
AT	13,2	kV
BT	220	V
PH	500	W
PC	1700	W



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Eficiencia de un transformador “mejorando pérdidas en el hierro”

Eficiencia Transformador vs Icarga

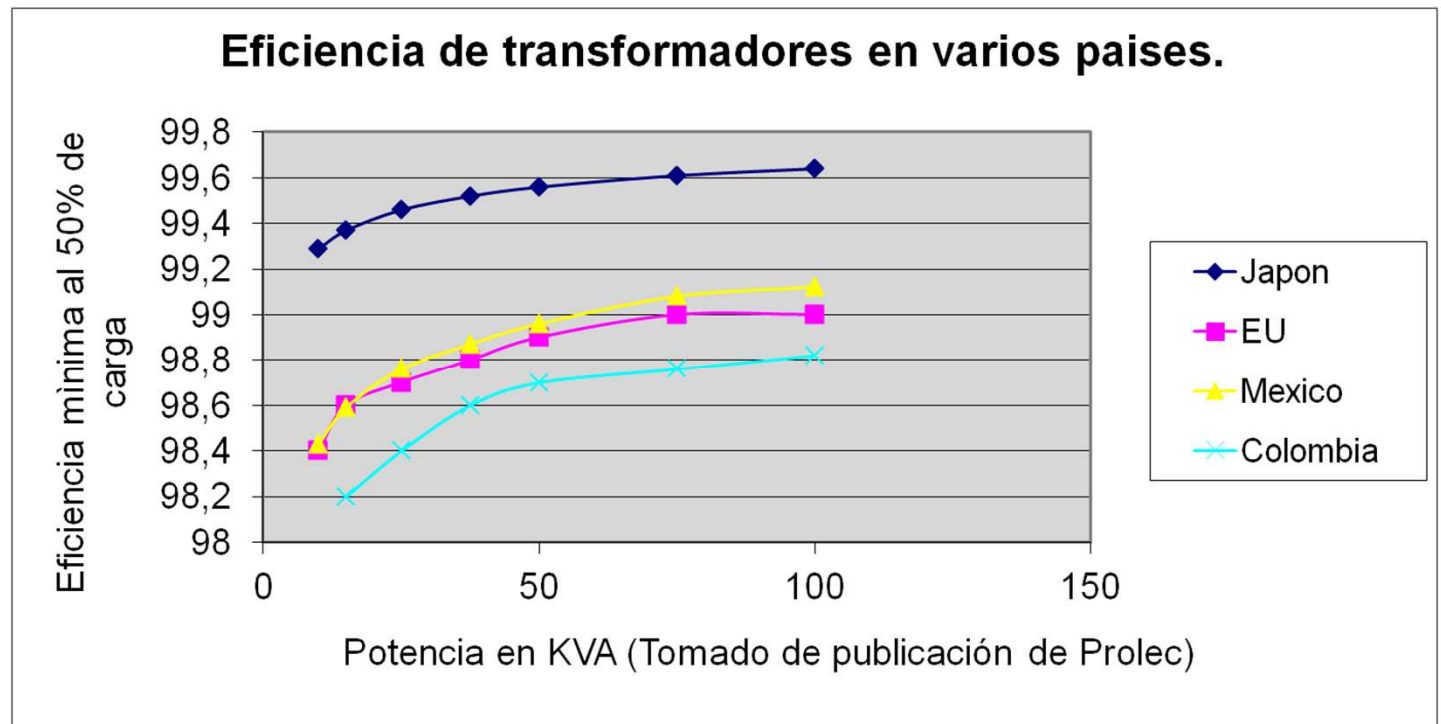


Transformador B		
S	112,5	kVA
AT	13,2	kV
BT	220	V
PH	200	W
PC	1400	W



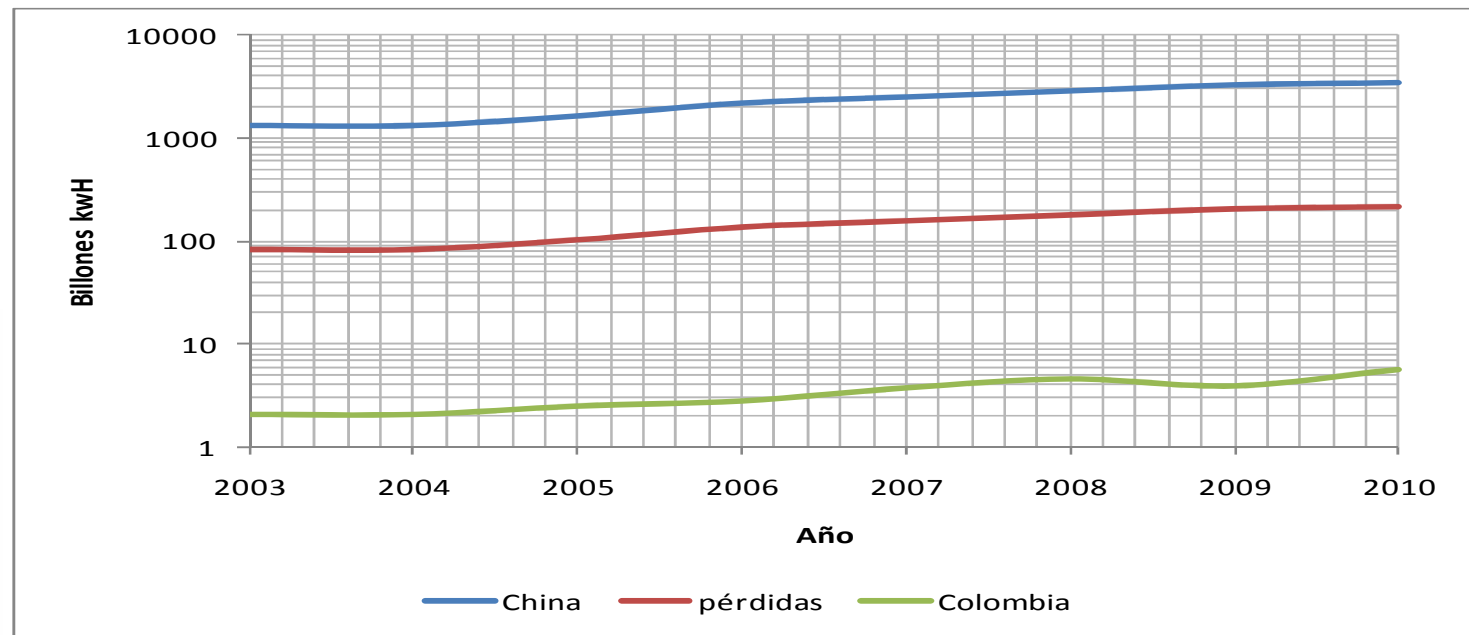
Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Comparación de eficiencias mínimas en transformadores



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Como comparar Colombia con China

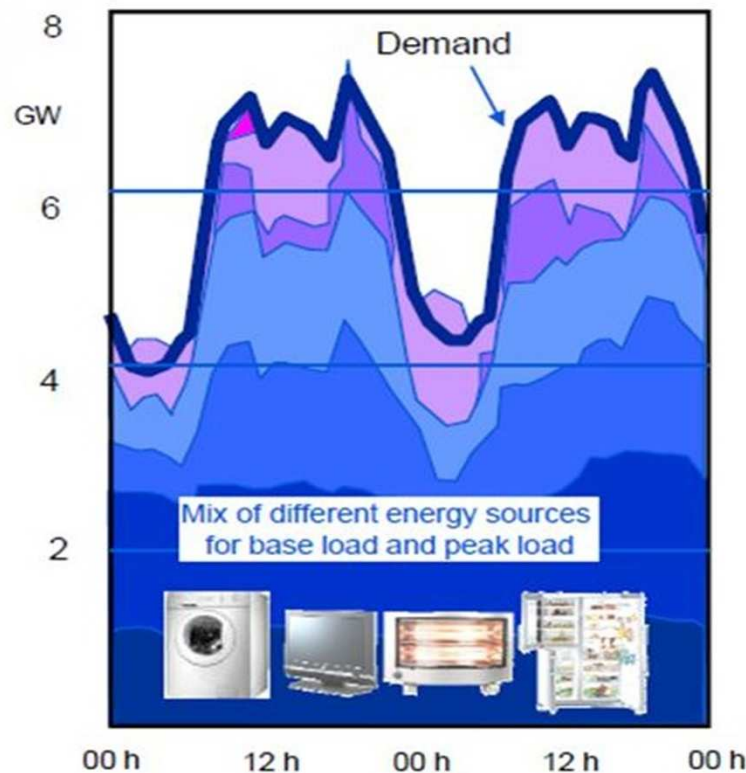


- China construye dos centrales generadoras por semana (UK Foreign Office)
- Las pérdidas de transmisión y generación de la China son equivalentes a 5.6 veces la energía consumida en Colombia.
- Si China reduce sus pérdidas en 1.1% es equivalente a ahorrar toda la energía generada en Colombia en un año



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Picos de demanda:



Obligan a generar con los sistemas mas costosos.

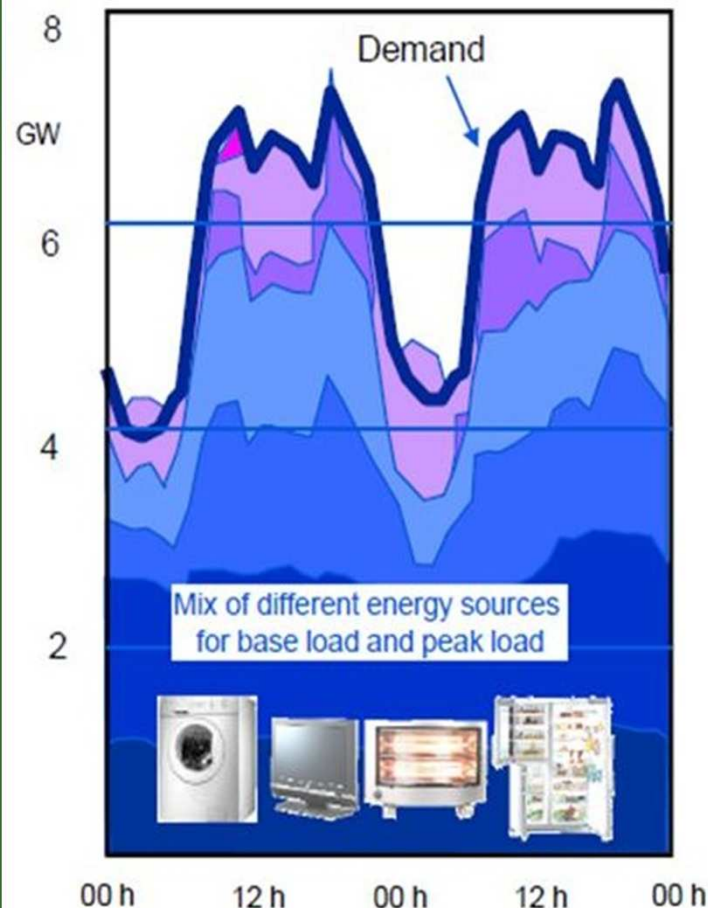
Si no hay forma de acumular puede haber desperdicio de energía “gratuita” durante periodos de muy bajo consumo.

Los equipos del sistema eléctrico deben especificarse para atender el pico de potencia y estarán ociosos (algunos con perdidas por conexión permanente) el resto del tiempo.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Picos de demanda:

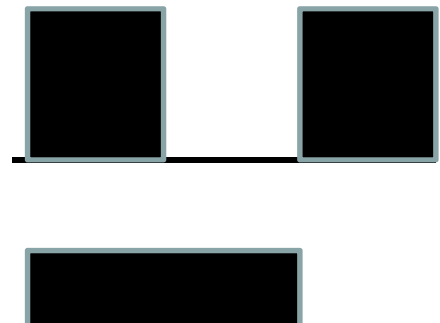


$$I \propto P_{\text{entregada}} \quad V \cdot \Sigma I \Delta t$$

$$I^2 \propto P_{\text{perdida en los conductores}} \quad R \cdot \Sigma I^2 \Delta t$$

$$(\Sigma [I^2 \Delta t] / T)^{0.5} \geq (\Sigma [I \Delta t] / T)$$

Si la curva fuera plana las pérdidas de conducción serían mínimas y la eficiencia energética máxima.



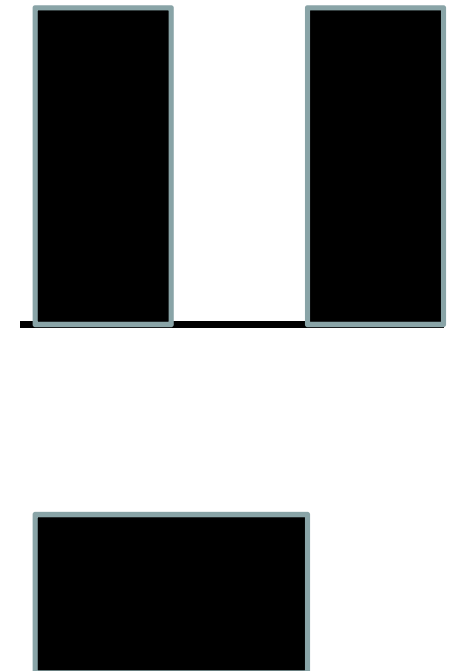
Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Picos de demanda:

$$(\Sigma[I^2\Delta t]/T)^{0.5} \geq (\Sigma[I\Delta t]/T)$$

La misma energía entregada en ambos casos implica un 41.4% mas de pérdidas de conducción, y eso sin considerar el incremento de la resistencia por el incremento de la temperatura, que pudieran incrementar un 10 o 15% adicional

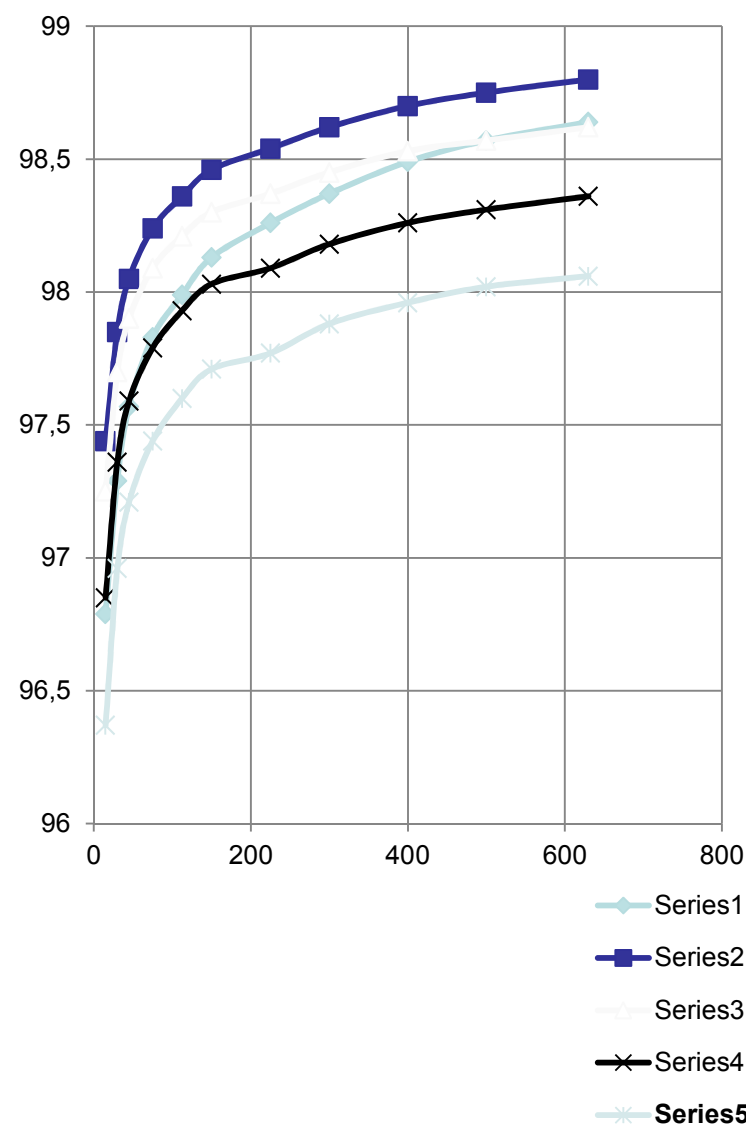
Hasta donde el proceso lo permita se debe apuntar a aplanar la curva de demanda, por las implicaciones nacionales y las ventajas locales.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

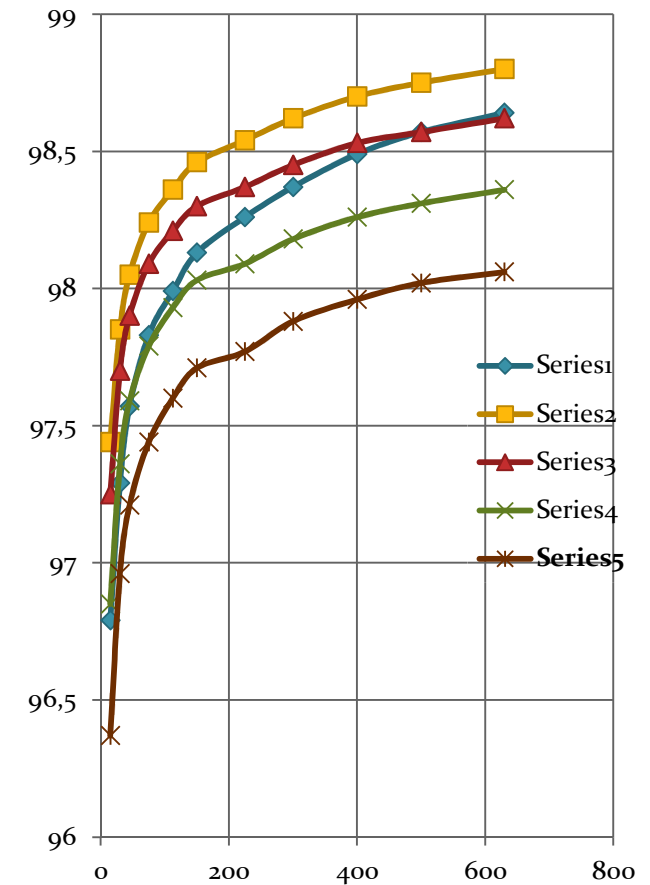
Eficiencia de transformadores (Tomado de Características técnicas de transformadores trifásicos fabricados por ABB)

	Porcentaje de carga del transformador				
P Nominal KVA	25%	50%	75%	100%	125%
15	96,79	97,44	97,25	96,85	96,37
30	97,29	97,85	97,7	97,36	96,96
45	97,57	98,05	97,9	97,59	97,21
75	97,83	98,24	98,09	97,79	97,44
112,5	97,99	98,36	98,21	97,93	97,6
150	98,13	98,46	98,3	98,03	97,71
225	98,26	98,54	98,37	98,09	97,77
300	98,37	98,62	98,45	98,18	97,88
400	98,49	98,7	98,53	98,26	97,96
500	98,57	98,75	98,57	98,31	98,02
630	98,64	98,8	98,62	98,36	98,06



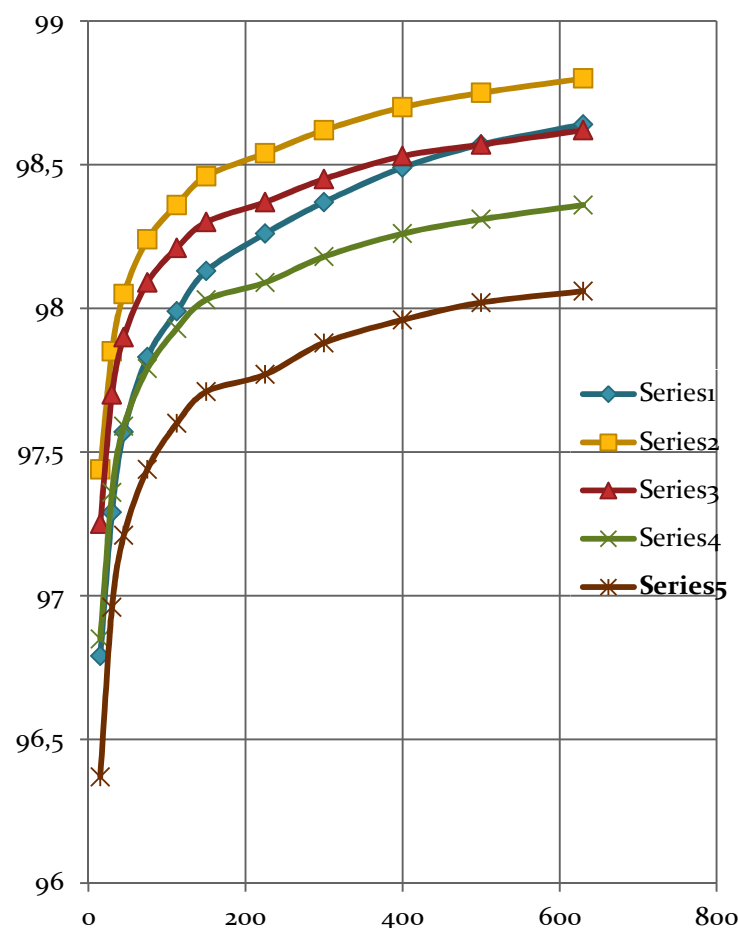
Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Eficiencia de transformadores (Tomado de Características técnicas de transformadores trifasicos fabricados por ABB)					
	Porcentaje de carga del transformador				
Pnomina I KVA	25%	50%	75%	100%	125%
15	96,79	97,44	97,25	96,85	96,37
30	97,29	97,85	97,7	97,36	96,96
45	97,57	98,05	97,9	97,59	97,21
75	97,83	98,24	98,09	97,79	97,44
112,5	97,99	98,36	98,21	97,93	97,6
150	98,13	98,46	98,3	98,03	97,71
225	98,26	98,54	98,37	98,09	97,77
300	98,37	98,62	98,45	98,18	97,88
400	98,49	98,7	98,53	98,26	97,96
500	98,57	98,75	98,57	98,31	98,02
630	98,64	98,8	98,62	98,36	98,06



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Eficiencia de transformadores (Tomado de Características técnicas de transformadores trifasicos fabricados por ABB)					
	Porcentaje de carga del transformador				
P nominal	25%	50%	75%	100%	125%
15	96,79	97,44	97,25	96,85	96,37
30	97,29	97,85	97,7	97,36	96,96
45	97,57	98,05	97,9	97,59	97,21
75	97,83	98,24	98,09	97,79	97,44
112,5	97,99	98,36	98,21	97,93	97,6
150	98,13	98,46	98,3	98,03	97,71
225	98,26	98,54	98,37	98,09	97,77
300	98,37	98,62	98,45	98,18	97,88
400	98,49	98,7	98,53	98,26	97,96
500	98,57	98,75	98,57	98,31	98,02
630	98,64	98,8	98,62	98,36	98,06



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

- Realizar un taller donde se vea la conveniencia o no de colocar mas de un transformador par alimentar una carga.
- En grupos de a tres personas donde haya electricistas.
- La UPME desarrolló una guía con la Universidad Tecnológica de Pereira para la selección de transformadores.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Ejemplo:

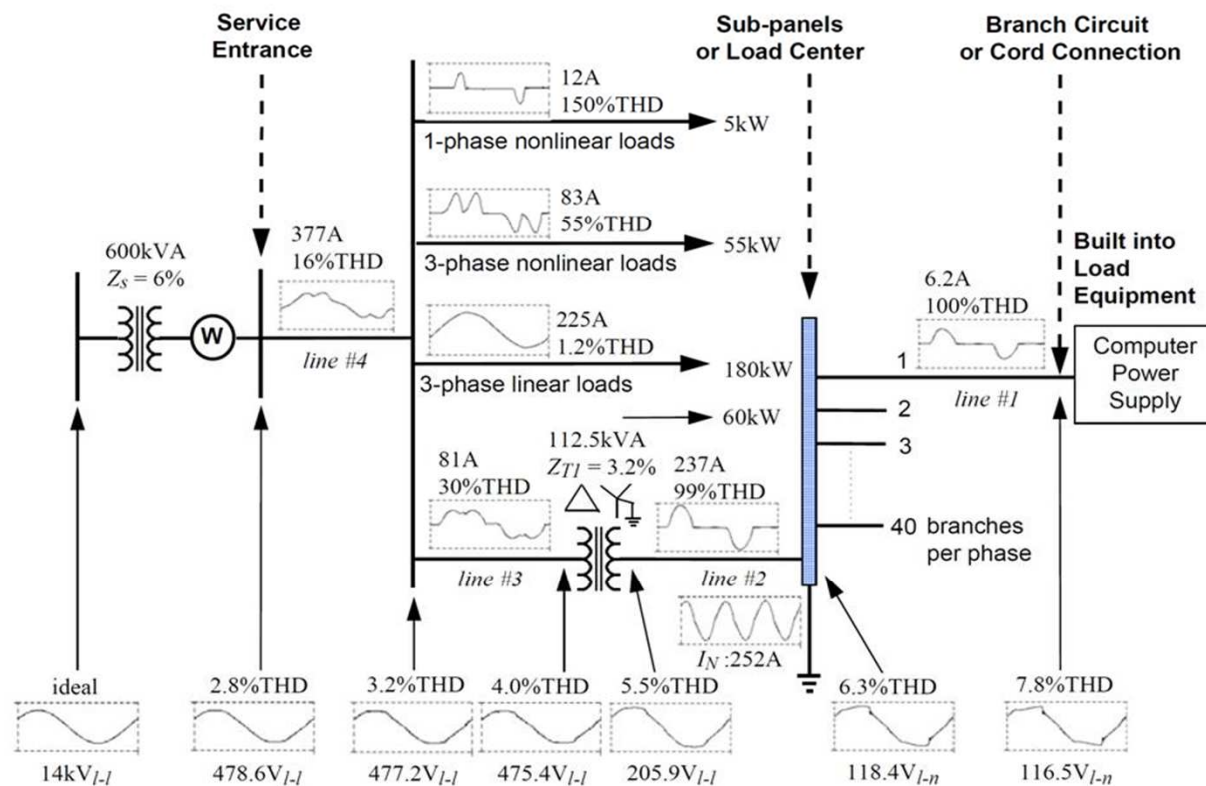
Una carga de las siguientes características (Incluye descuento que proveedores de material hacen a mayoristas)

P (kW)	50
FP	0,9
V _{LL} (V)	440
I (A)	126
Factor de planta	0,7
IRMS/Imed	0,8
Longitud (m)	50
Calibre RETIE(AWG)	2 (THHN)
Tarifa (\$/kWH)	350
Interes (% anual)	8
Dest en materiales (%)	40



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Generación y propagación de corrientes armónicas



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Perdida de Potencia de motores como una función del desbalanceo en las tensiones en porciento

Definición de desbalance:

Según IEC 61000-4-30

$$u_2 = 100\% U_2 / U_1$$

U_2 = Comp. de secuencia negativa U_{LL}

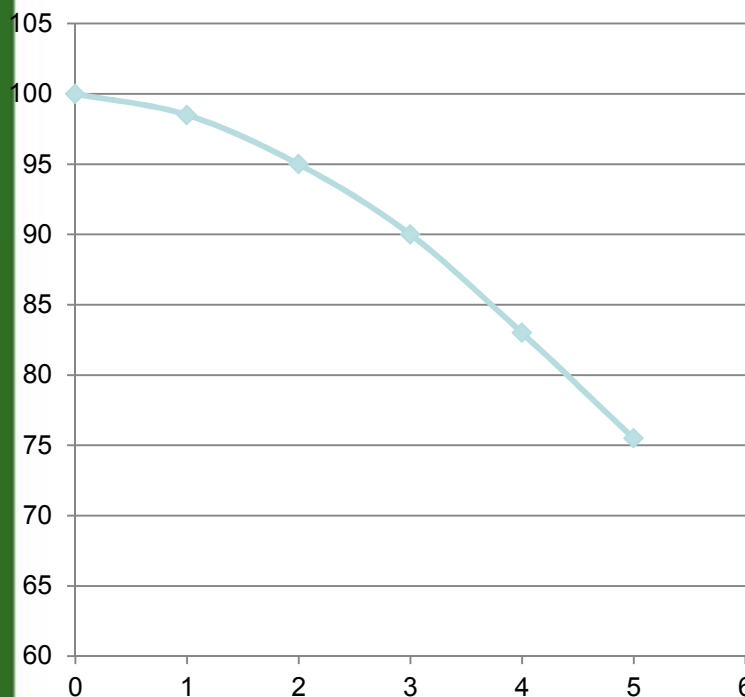
U_1 = Comp. De secuencia positiva U_{LL}

Según IEEE 1159

$$u_2 = \text{Max} ((V_{ij} - V_m) / V_m)$$

V_{ij} es la tensión entre líneas

V_m promedio de las tres tensiones



Tomado de: **Javier Ortega Solís .Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica**



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

La distorsión armónica de la corriente.

- Grandes corrientes por el conductor neutro (sobrecalentamiento de los cables)
- Sobrecalentamiento de cables por efecto piel (señales de alta frecuencia)
- Disparos indeseados de interruptores
- Baterías de condensadores (resonancia. Amplificación armónica)
- Acoplamiento de ruido en líneas telefónicas
- Sobrecalentamiento transformador (desclasificación, aumento de K)

$$(I_{rms})^2 = (I_1)^2 * (THD^2 + 1)$$



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

El factor de Potencia de la carga.

El defasaje entre la corriente y la tensión en un sistema eléctrico origina incremento en la corriente para transportar el mismo nivel de potencia. Por lo que se incrementan las pérdidas de energía en conductores y transformadores.

$$(I_2)^2 = (I_1)^2(1/\cos\phi)^2$$

Se debe tarara en lo posible de disminuir el factor de potencia hasta los limites económica y técnicamente razonables.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

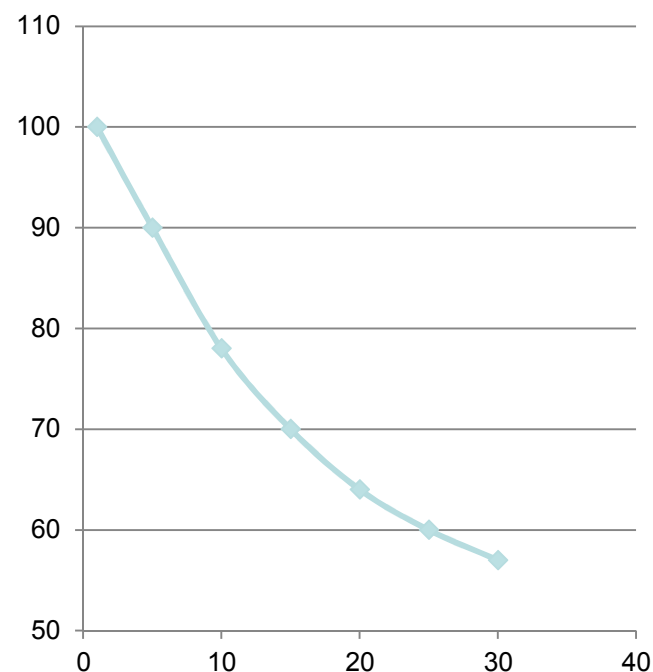
La distorsión de la corriente de carga se puede cuantificar por el factor k , para el derrateo de transformadores

Se prefieren transformadores diseñados para cierto factor k , que solamente el derrateo de los transformadores normales.

Tomado de: INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

<http://www2.ubu.es/ingelec/ingelect/tcadiz.pdf>

Derrateo, en % de la potencia nominal, como función del factor k de la carga



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

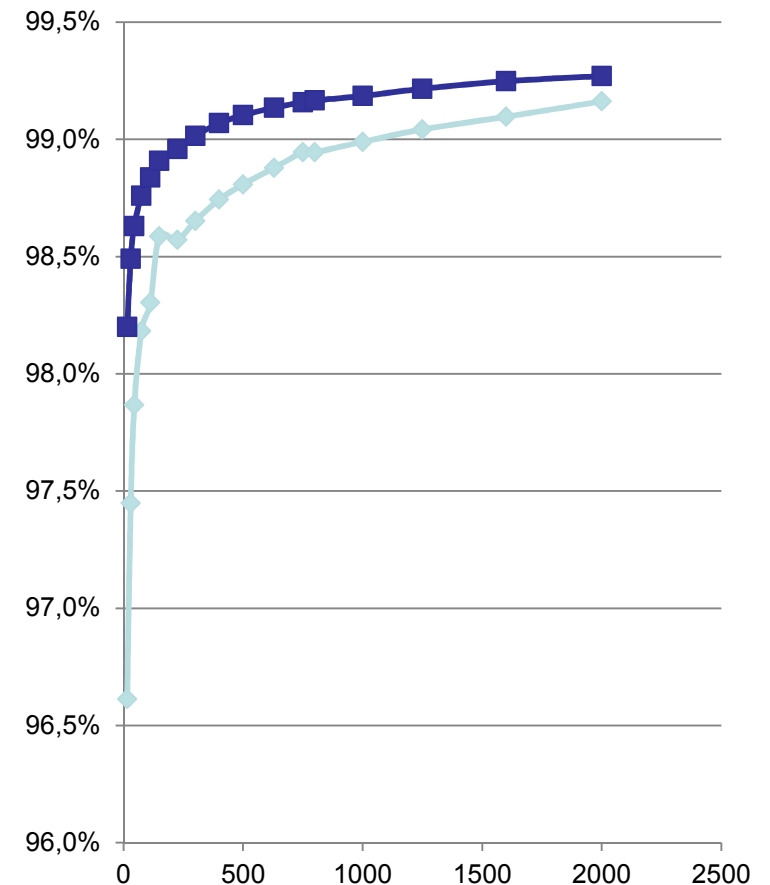
- $K = \sum (I_h \cdot h)^2$ para todo h desde 1 hasta h_{max} .
- Siendo I_h el valor eficaz del armónico h dividido por el valor eficaz de la corriente nominal.



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Pérdidas admisibles en Colombia (NTC 3445 Tabla 1 MT/BT)
Potencia nominal (Trifásicos Secos 75°C))

P Nominal kW	H Secos (75°)	H Aceite (85°C)
15	96,6%	98,2%
30	97,4%	98,5%
45	97,9%	98,6%
75	98,2%	98,8%
112	98,3%	98,8%
150	98,6%	98,9%
225	98,6%	99,0%
300	98,7%	99,0%
400	98,7%	99,1%
500	98,8%	99,1%
630	98,9%	99,1%
750	98,9%	99,2%
800	98,9%	99,2%
1000	99,0%	99,2%
1250	99,0%	99,2%
1600	99,1%	99,2%
2000	99,2%	99,3%



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Transformador eficiente:

Se están desarrollando materiales ferro magnéticos de que disminuyen ampliamente las perdidas en el núcleo por histéresis y corrientes de Eddy.

Potencia kVA	Pérdidas en Vacío monofásicos ⁽¹⁾		
	Amorfo	Ferro silicio	% Reducción
25	20	66	70%
37,5	26	86	70%
50	40	123	67%

(1) Información tomada de : Alta Eficiencia. Prolec –GE



Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos

Transformador eficiente... Continuación

Potencia kVA	Pérdidas en Vacío Trifásicos ⁽¹⁾		
	Amorfo	Ferro silicio	% Reducción
45	63	166	62
75	85	233	64
112.5	109	284	62

(1) Información tomada de : Alta Eficiencia. Prolec –GE

Una reducción en las pérdidas en vacío (hierro) hace que la eficiencia máxima se consiga a niveles de carga mas bajos, lo que resta conveniencia de trabajar con transformadores mas pequeños en horas de baja carga.





Eficiencia Energética en Sistemas Eléctricos.

Gracias



OPEN

OPORTUNIDADES
DE MERCADO PARA
ENERGÍAS LIMPIAS
Y EFICIENCIA
ENERGÉTICA

MIF
FOMIN

caem

CORPORACIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL
F.I. Cámara de Comercio de Bogotá

CAMARA
DE COMERCIO DE BOGOTÁ
Por nuestra sociedad

Programa OPEN - Cámara de Comercio de Bogotá